

# 압전 션트회로를 이용한 광저장 디스크 드라이브의 진동 저감 Vibration Reduction of Optical Storage Disk Drive Using Piezoelectric Shunt

박종성<sup>O\*</sup>·임수철<sup>\*</sup>·최승복<sup>\*\*</sup>·김재환<sup>\*\*</sup>·박영필<sup>\*\*\*</sup>  
J. S. Park, S. C. Lim, S. B. Choi, J. H. Kim, Y. P. Park

Key Words : Optical Disk Drive(O.D.D), Piezoelectric Shunt, Admittance, Multi-mode Vibration Reduction

## ABSTRACT

This paper presents a piezoelectric shunt methodology to reduce unwanted vibration of optical disk drive(O.D.D.). After briefly investigating a second-order mechanical vibration absorber model, the O.D.D. structure is incorporated with the piezoelectric shunt circuit. In order to evaluate feasibility of multi-mode passive damping of the structure, admittance measurement of piezoceramic is undertaken. The parameters are optimally tuned by admittance measurement results on the basis of the circuit model and displacement transmissibility is evaluated. To verify validity of admittance measurement result, experiment is performed and vibration reduction is achieved at two different modes.

## 1. 서론

광 디스크 드라이브(optical disk drive, O.D.D.)는 음성, 영상 및 데이터 정보 등 소위 멀티미디어 정보를 저장(기록)하거나 재생(검색)하는데 있어서 대표적인 광 저장장치로써, 제 1 세대 계열의 CD-ROM, CD-R/RW, 그리고 제 2 세대 계열의 DVD-ROM/RAM/RW 등 다양한 미디어 형태를 이루며 하드 디스크 드라이브와 더불어 2 차 저장매체로써 확고한 위치를 차지하고 있다. 이들 중 특히 2 세대 미디어 용 저장기기의 경우, 높은 저장 밀도와 함께 안정적인 고속의 데이터 입,출력을 요구하고 있다.<sup>(1)</sup> 따라서, 드라이브 내에서 발생하는 진동 등에 의한 드라이브의 신뢰성 문제가 매우 중요시되고 있는 실정이다.

광 픽업 장치의 대물렌즈는 비교적 강성이 작은 구조물에 지지되어 있고, VCM(voice coil motor)으로 구동되는 작동기로 구성되어 작은 전류에도 빠른 응답과 큰 가동 범위가 가능하도록 되어 있다. 그러나 드라이브가 고배속, 고밀도화 되어갈수록 외부의 진동 및 충격에 그 성능이 매우 민감하여 제어 가능 이상의 외란에 노출될 경우 기록 및 재생의 오동작 가능성이 높아지며, 또한 내부 진동원에 대해서도 대책이 마련되어야 하는 등 광 기록 재생 기기의 기본적인 구조상 진동에 매우 취약하다는 특성을 내재하고 있다.<sup>(2,3)</sup> 현재의 상용 광 디스크 드라이브에는 스피들 및 광 픽업을 포함하는 피딩 시스템의 진동 감쇠를 위하여 점탄성재의 방진부가 설치되어 내, 외부에서 발생하는

진동을 흡수하도록 하고 있는데, 내부의 불균형된 디스크로부터 발생하는 슬레드 베이스의 진동과 이로 인한 외부로의 진동 전달을 방지하기 위하여 적절한 강성과 감쇠를 갖는 방진부 설계가 필요하며, 현재 유한요소법을 이용한 방진재료의 거동 해석과 실험을 통한 연구가 진행되어 왔다.<sup>(2-4)</sup> 또한, 24 배속 이상의 고배속 장치에서 기존의 점탄성 재료만을 이용한 방진부 설계의 한계를 극복하기 위하여 자동 불 균형장치<sup>(5)</sup>를 채용하거나 ER 유체를 이용한 드라이브 마운트<sup>(6)</sup>가 제안되었다. 그러나 실제 드라이브에 있어서 테크 메커니즘을 구성하는 부품들의 진동 특성 역시 피딩 시스템의 진동 특성에 많은 영향을 주게되며, 특히 메인 베이스가 공진을 일으킬 경우 광 픽업에 의한 기록 및 재생과정에 치명적인 결함을 유발시킬 수 있다. 현재까지는 주로 방진부 설계에 대한 방향제시 차원에서 메인 베이스의 진동 특성 연구가 진행되고 있으며<sup>(7)</sup> 압전 션트회로를 이용하여 메인 베이스에 대한 단일모드 수동감쇠에 대한 연구도 시도되고 있지만<sup>(8)</sup> 아직은 피딩 시스템에 비하여 부족한 상태라 할 수 있다.

본 연구에서는 대표적인 지능 재료인 압전 재료(piezoelectric material)로 구성되는 션트회로(shunt circuit)를 이용하여 광 디스크 드라이브용 메인 베이스의 다중 모드 수동 감쇠성능을 고찰하고자 한다. 이를 위하여 먼저 메인 베이스에 압전재료를 부착하고 임피던스 측정기를 이용하여 구조물에 부착된 압전재료의 어드미턴스(admittance)를 측정하여 다중 모드 감쇠성능을 예측한 후, 실험을 통하여 메인 베이스의 진동감쇠 성능을 검증하였다.

\* 인하대학교 대학원 기계공학과  
E-mail : totoro@inhavision.inha.ac.kr  
Tel : (032) 872-7925, Fax : (032) 868-1716

\*\* 인하대학교 기계공학과

\*\*\* 연세대학교 기계공학과

## 2. 압전 재료를 이용한 수동감쇠

수동감쇠의 효율성은 손실계수(loss factor)의 최대치와 그 값이 유지되는 주파수 영역의 폭에 의하여 결정되며, 높은 손실계수가 넓은 주파수영역에 걸쳐 유지되는 감쇠재를 일반적으로 좋은 감쇠재라 한다. 점탄성 재료는 기계진동의 수동감쇠 재료로서 널리 알려져 있으나 위의 두 가지 조건이 서로 상반되는 성질을 가지고 있기 때문에 이를 극복하기 위한 수동 감쇠재로서 압전재료가 도입되었다. 압전재료 중 압전세라믹(piezoelectric ceramic)은 높은 강성과 손실계수를 가지고 있으며 특히 압전재료의 강성은 압전재료에 가해지는 전기적 경계조건에 따라 변화되는데 이러한 강성 변화에 의한 감쇠 효과는 점탄성재료와 같은 방법으로 나타낼 수 있다. (9), (10)

압전재료로 부터는 강성 변화에 의한 감쇠효과 이외에도 에너지 측면에서의 감쇠효과도 얻을 수 있다. 개회로 상태에서의 압전재료는 외부로부터의 압력으로 인한 기계적 에너지를 전극표면에 전기적 에너지의 형태로 저장한다. 이 때 전극에 저항을 연결하면 축적된 전기에너지 중 일부가 압전재료의 양단에 연결된 션트회로를 거쳐 저항을 통해 소산되는데 이러한 에너지 소산으로 인한 시스템의 감쇠효과를 압전재료를 이용한 수동감쇠라고 한다. 압전재료에 연결하는 션트회로의 종류에는 압전체와 저항회로를 사용하는 경우와 압전체와 저항 그리고 인덕터를 사용하는 두가지 경우가 가장 일반적이다. 이때 압전재료에 의해 변환된 전기에너지는 단지 저항에서만 소모되고 인덕터와 캐패시터에는 저장된다. 두번째의 경우 인덕터는 압전재료 고유의 정전용량(capacitance)과 함께 션트회로에 대상 구조물의 공진 주파수에 가까운 공진을 일으켜 해당 모드에서 보다 많은 전기에너지를 이동할 수 있게 하여 에너지 소산을 도와주게 되는데 이 방법을 공진회로 션트(resonant shunt)라 하고 첫번째의 경우를 저항회로 션트(resistive shunt)라 한다. 본 연구에 사용된 방법은 공진회로 션트이다.

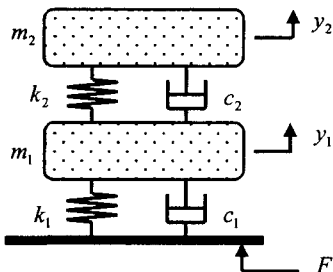


Fig. 1 2-D.O.F mechanical vibration absorber model

## 3. 압전 재료를 이용한 구조물의 다중 모드 수동감쇠 모델링

Hagood 등(9)이 압전 션트회로를 이용하여 구조물의 단일 모드 수동감쇠에 성공한 이후 많은 연구자들이 다중 모드 수동감쇠에 대한 연구를 수행하였다. 특히 Hollkamp(10)는 Hagood의 단일 모드 수동 감쇠 알고리즘을 다중모드에 적용하여 단일 압전재료를 이용한 다중모드 수동감쇠 방법을 제안하였으며 이를 실험으로 증명하였다. 한편, 김(11) 등은 Hollkamp가 수행한 단일모드 수동감쇠에서 얻어진 각종 매개 변수들을 다중모드 수동감쇠에 적용하는 것에 문제가 있음을 지적하고 전기적 임피던스 튜닝법을 제안하여 보다 정확한 시스템 모델링을 구현하였으며 이를 실험으로 검증하였다.

본 연구는 메인 베이스에 대한 다중 모드 수동 감쇠의 가능성 테스트로서 먼저 단일 압전 재료를 이용한 다중 모드 수동 감쇠에 초점을 맞추고 연구를 진행하였다. 따라서 연구방법은 Hollkamp의 다중 모드 수동 감쇠 방법을 따르며, 이는 Hagood 등의 단일 모드 수동감쇠의 모델링 방법과 유사하다고 볼 수 있다.

### 3.1 기계진동 흡진기모델

Fig. 1 과 같은 2 차 시스템에서  $m_1, k_1, c_1$ 을 각각 고려대상(구조물)의 질량, 강성, 댐핑이라 하고  $F$ 는 구조물에 가해지는 가진력, 그리고  $m_2, k_2, c_2$ 는 기계진동 흡진기의 질량, 강성, 댐핑이며 기계진동 흡진기의 질량  $m_2$ 는 고려대상의 질량  $m_1$ 보다 작다. 이와 같은 시스템에서는  $m_1$ 이 전혀 진동하지 않는데 이것은  $k_2, c_2$ 가 가진력과 같은 크기를 가지며 반대방향으로 작용하여 정미력(net force)을 제거하기 때문이다. 기계적 시스템은 기계-전기 회로상사(circuit analogy)이론에 의해 상응하는 전기회로 모델로 변환할 수 있는데 이를 이용하여 Fig. 1의 기계적 모델을 Fig. 2의 전기적 임피던스 모델로 나타낼 수 있다. Fig. 3은 구조물에 압전체가 부착되어 있을 때, 구조물과 압전체 그리고 션트 회로의 전기적 임피던스 모델을 나타낸다.

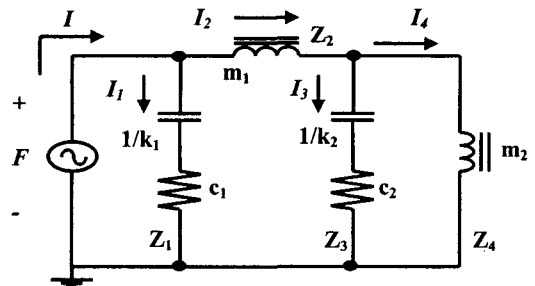


Fig. 2 2-DOF electrical impedance circuit model

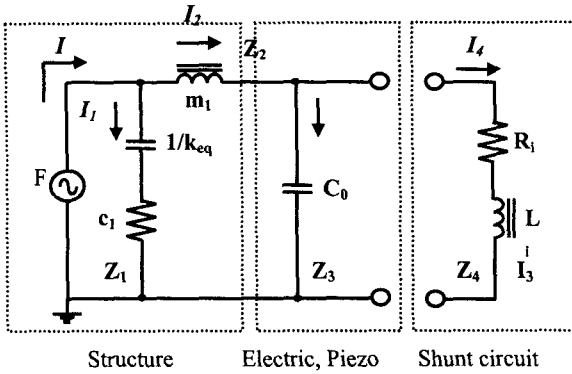


Fig. 3 Electrical model of structure-shunt circuit-piezoelectric material

### 3.2 압전재료의 기계적 임피던스 모델

상기한 바와 같이 본 연구에서는 압전재료의 기계적 임피던스를 이용하여 선트회로가 포함된 구조물(메인 베이스)의 변위에 대한 전달함수를 유도하기 위해 Hagood<sup>(9)</sup>의 방법을 사용하였다. 이때 구조물은 댐핑이 없는 것으로 가정하며 선트회로는 공진회로 선트를 사용한다. Hagood 는 압전재료의 구성방정식으로부터 압전재료와 선트회로의 전기적 임피던스를 유도하고 이로부터 선트 시스템의 기계적 임피던스를 유도 하여 이를 1 자유도의 질량-감쇠기-스프링 모델에 적용하여 변위에 대한 전달함수를 유도하였다. 다음 식은 공진회로 선트의 전기적 임피던스를 나타낸다.

$$Z_i^{SU} = Ls + R \quad (1)$$

이 때, 압전재료의 횡방향만의 작용을 고려하여 외부회로가 연결된 압전재료의 기계적 임피던스를 유도 하면 식 (2)와 같은 스칼라형태의 식으로 표현된다.

$$\tilde{Z}_{11}^{ME}(s) = \frac{Z_{11}^{SU}(s)}{Z_{11}^D(s)} = \frac{(1 - k_{31}^2)}{\left[ 1 - k_{31}^2 \frac{eL}{Z_3(s)} \right]} \quad (2)$$

이때  $Z_{ij}^D$  는 개회로 상태에서의 압전재료의 임피던스이고,  $Z_i^{EL}$  은 압전재료의 전기적 임피던스,  $k_{31}$  는 압전재료의 전기-기계 결합계수이다. 이제 식 (1)과 (2)를 이용하여 구조물에 대한 변위 전달함수를 유도하면 다음과 같다.

$$\frac{x}{x^{ST}} = \frac{\gamma^2 + \delta^2 r \gamma + \delta^2}{(\gamma^2 + 1)(\gamma^2 + \delta^2 r \gamma + \delta^2) + K_{ij}^2 (\gamma^2 + \delta^2 r \gamma)} \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{s}{\omega_n^E}, \quad r = R_i C_{pi}^s \omega_n^E, \quad \delta = \omega_e / \omega_n,$$

$$\omega_e = 1 / \sqrt{L_i C_{pi}^s}$$

여기서,  $x/x^{ST}$  는 2 자유도 진동모델에서 주 시스템(primary system, 본 연구에서는 구조물)의 준정적 상태에서의 변위와 동적 상태에서의 변위의 비라 할 수 있으며 위의 준정적 상태의 변위  $x^{ST}$  는  $x^{ST} = F/K_{tot}$  로 나타낼 수 있는데  $K_{tot}$  은 구조물의 모달 강성과 폐회로상의 압전재의 모달강성의 합이다. 한편,  $K_{ij}$  는 일반화된 전기-기계 결합계수 (generalized electro-mechanical coupling coefficient),  $C_{pi}^s, R_i, L_i, \omega_e$  는 각각 선트회로에서의 정전용량, 저항, 인덕턴스 그리고 회로의 공진을 나타내며  $\omega_n$  은 구조물의 공진을 나타낸다. 식 (3)을 통하여 변위의 전달율은 임의로 조절할 수 있는 선트회로에 관계되는 변수들과 구조물의 공진으로 나타낼 수 있음을 알 수 있고 따라서 구조물의 공진점, 즉 해당 모드와 주파수를 알아내면 나머지 변수들을 결정하여 전달율을 조절할 수 있게 된다.

### 4. 어드미턴스 측정

전 절에서 언급한 바와 같이 압전 선트회로를 이용한 수동감쇠에 있어서 공진 회로 선트를 이용할 경우, 선트회로는 임피던스가 가장 작을 때 보다 효율적으로 구조물의 진동에너지를 소산시킬 수 있다. 어드미턴스는 임피던스의 역수로 정의되므로 어드미턴스 값이 클수록 에너지 소산에 유리함을 알 수 있는데 본 절에서는 임피던스 측정기를 이용하여 메인 베이스에 부착되어 있는 압전재료의 어드미턴스를 측정하여 진동감쇠 성능을 예측하였다.

Fig. 4 는 본 연구에 사용된 광디스크 드라이브의 메인 베이스와 압전 재료의 부착위치를 나타낸 그림이다. 스피너들을 비롯하여 광 픽업장치를 포함하는 피딩 시스템 대부분이 메인 베이스에 장착이 되며 따라서 적절한 압전재료와 선트회로를 부착하여 메인 베이스의 진동을 저감시킴으로써 내부적으로 발생하는 진동의 외부전달을 억제하거나 외부에서 들어오는 외란이 광픽업 및 피딩시스템으로 전달되는 것을 방지할 수 있게 된다. Fig. 5 는 메인 베이스에 부착된 압전재료의 컨덕턴스 (conductance)를 측정한 그림으로 컨덕턴스는 어드미턴스의 실수부분을 나타낸다. 횡축은 어드미턴스 측정을 위해 임피던스 측정기에서 압전재료에 가해진 주파수이며 253Hz 와 402Hz 에서 다른 값들에 비해 매우 큰 어드미턴스 값을 보이고 있다. 이는 해당 주파수에서 압전재료의 임피던스 값이 여타 다른 주파수에서 보다 작은 것을 나타내고 따라서 해당 주파수에서 메인 베이스의 진동에너지 소산이 보다 원활히 이루어질 수 있음을 의미한다.

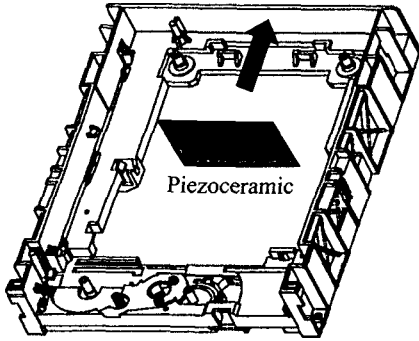


Fig. 4 Main base of optical disk drive

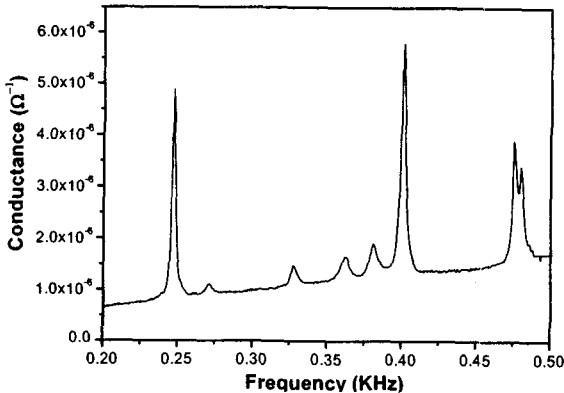


Fig. 5 Measured conductance of piezoceramic

### 5. 파라미터 튜닝 및 시뮬레이션 결과

Fig. 5 에서 구해진 2 개의 어드미턴스 최대값에 대한 해당 주파수를 이용하여 파라미터 튜닝을 수행하였다. 해당 주파수를 식 (3)에 대입하면 파라미터 튜닝을 통하여 효과적인 수동감쇠 성능을 발휘할 수 있도록 최적의 인덕턴스와 저항값을 구할 수 있으며 본 연구에서는 Hagood 가 제안한 기계진동 흡진기법을 이용하였다. 기계진동 흡진기는 2 자유도 시스템으로써 1 차와 2 차 공진주파수를 거의 일치시켜 서로간의 상대운동을 통하여 진동을 억제한다. 이러한 시스템의 경우, 2 차 시스템의 댄핑에 상관없이 전달함수의 크기가 변하지 않는 두개의 고정점이 1 차시스템의 공진 주파수 좌, 우측에 존재한다. 이 고정점에서의 크기를 같게 하여 최적의 질량(인덕턴스)을 구하게 되며 최적의 댄핑(저항)은 1 차 시스템의 공진 주파수에서의 전달함수의 크기를 고정점에서의 크기와 일치시켜서 얻는다. 이 방법을 식(3)에 대입하여 다음과 같은 최적값을 얻는다.

$$\delta^* = \sqrt{1 + K_{ij}^2}, \quad r^* = \sqrt{2K_{ij}} / (1 + K_{ij}^2) \quad (4)$$

$$R^* = r^* / C_{pi}^s \omega_n, \quad L^* = 1 / C_{pi}^s \omega_e^2 \quad (5)$$

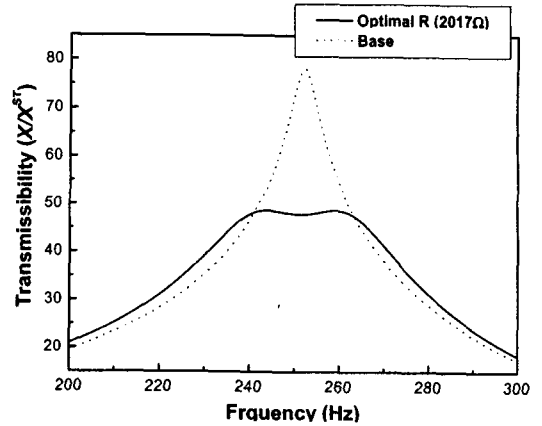


Fig. 6 Displacement transmissibility at 259Hz

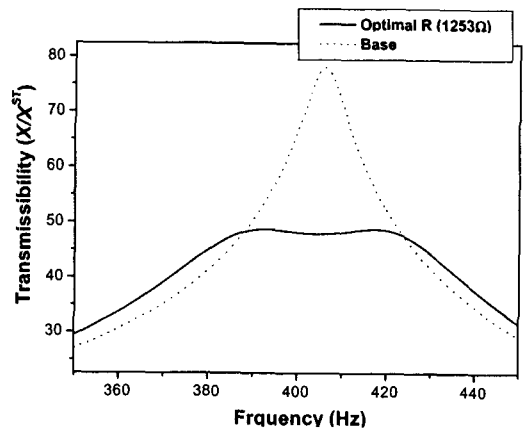


Fig. 7 Displacement transmissibility at 414Hz

Fig. 6, 7 은 해당 주파수에서의 변위 전달률을 나타낸 그림으로 식 (4)와 (5)를 통하여 결정된 최적 파라미터들을 사용하여 얻어진 것이다.

### 6. 실험 결과 및 토의

어드미턴스 측정에서 얻어진 주파수에서 실제 진동 감쇠가 발생하는지, 또한 파라미터 튜닝에 의해 얻어진 최적 값들의 유효성을 검증하기 위하여 실험을 수행하였다. Fig. 5 에서 구해진 2 개의 어드미턴스 최대값에 대한 해당 주파수를 이용하여 파라미터 튜닝을 수행하였다. Fig. 8 은 압전 셉트회로를 이용한 CD-ROM 드라이브 메인 베이스의 진동 절연 성능을 고찰하기 위해 구성된 실험 장치를 나타낸다. 외란에 의한 메인 베이스의 진동과 셉트회로에 의한 진동감쇠의 크기는 가속도계와 신호분석기를 통하여 검출되고 외란은 드라이브 베이스를 고정하는 지그에 장착된 임의의 가진용 압전세라믹에 의하여 작동 주파수 범위에서 발생된다.

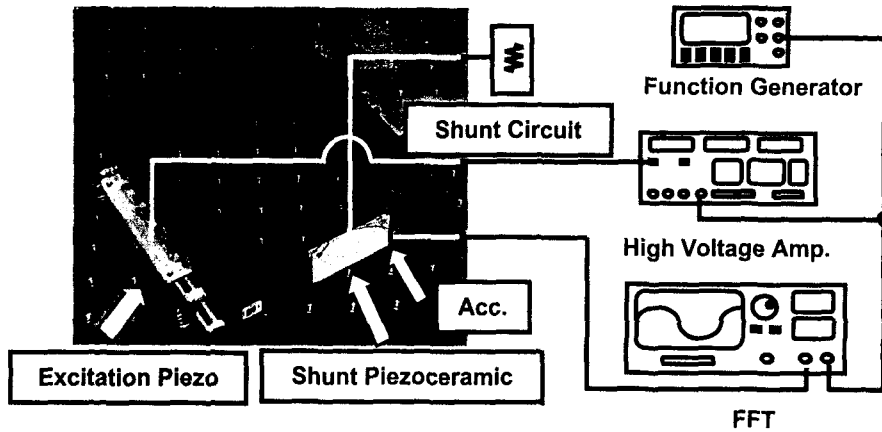


Fig. 8 Experimental apparatus

Fig. 9 는 압전재료가 장착된 메인 베이스의 주파수 응답특성을 나타낸 그림으로 223Hz, 251Hz, 284Hz, 372Hz, 404Hz, 452Hz, 등에서 주요 모드가 발생함을 알 수 있는데 Fig. 5 의 어드미턴스 측정결과와 비교했을 때 양쪽의 피크치가 발생하는 주파수가 상당히 근접하여 있음을 알 수 있다. 특히 251Hz 와 404Hz 에서는 Fig. 5 의 어드미턴스 값을 고려할 때 메인 베이스의 유의성있는 진동 저감을 예상할 수 있다. Fig. 10 (a)는 압전 셉트회로를 가동시켰을 때 메인 베이스 후면의 주파수 특성을 나타낸 그림이다. Fig. 5 에서 예견되었듯이 251Hz 에서 약 6.7dB 의 진동감쇠 성능을 나타냄을 알 수 있고 Fig. 10 (b)는 시간영역에서의 진동양상을 나타낸 것으로써 셉트회로 작동 시 가속도의 크기가  $11.1m/s^2$  에서  $5.1m/s^2$  으로 감소함으로 알 수 있으며 이는 진동 변위가  $4.5\mu m$  에서  $2.0\mu m$  로 감소하였음을 의미한다. Fig. 11 (a), (b)는 각각 Fig. 5 의 두번째 피크 지점인 404Hz 에서의 주파수 응답특성과 시간영역에서의 진동양상을 나타낸 것으로서 약 3.4dB,  $1 m/s^2$  의 진동이 감소했음을 보여주고 있다. Table 1에 실험에 사용된 각종 파라미터와

시뮬레이션에 의해 얻어진 파라미터를 비교하였다. 비교적 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

## 7. 결론

본 연구에서는 정보저장기기의 하나인 광디스크 드라이브의 진동저감을 위하여 압전 셉트회로를 사용하였다. 광 디스크 드라이브의 메인 베이스에 대하여 압전 셉트회로를 이용한 다중 모드 수동 감쇠를 위해 메인 베이스에 부착된 압전재료의 어드미턴스를 측정하여 다중 모드 수동 감쇠 성능을 예측하였다. 측정된 어드미턴스 중 가장 큰 값에 해당하는 주파수를 목표 주파수로 정하여 시뮬레이션을 통하여 최적의 파라미터를 구하였고 이를 이용하여 실험을 수행하여 다중 모드 수동 감쇠성능을 검증하였다. 실험 결과 어드미턴스의 측정 결과를 근거로 예측한 두개의 주파수에서 유의성있는 진동 감쇠 효과가 나타났으며 실험에 사용된 파라미터와 시뮬레이션을 통하여 얻은 파라미터의 값이 큰 차이가 없음을 확인하여 사용된 모델의 적합성을 검증하였다. 본 연구에서 선정된

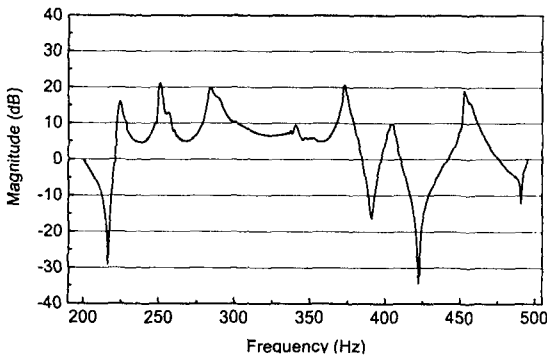
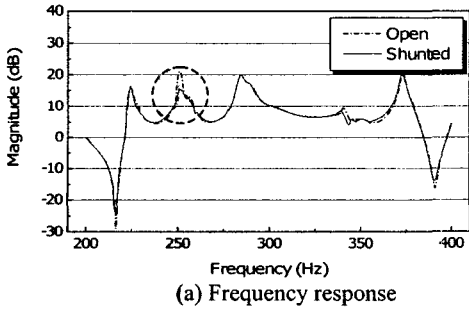


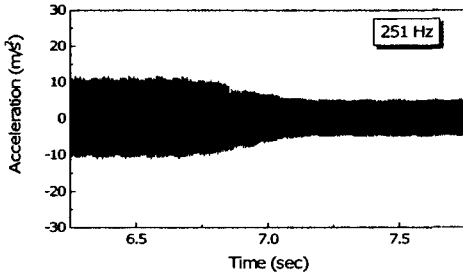
Fig. 9 Frequency response of the CD-ROM drive base in open circuit

Table 1 Comparison of shunt system parameters between simulation and experiment

	Sim. 1	Exp. 1	Sim. 2	Exp. 2
$f_n$ (Hz)	253	251	402	404
$L$ (H)	9.14	8.62	3.53	3.15
$R$ ( $\Omega$ )	2017	1822	1253	1173
$C_0$ (nF)	4.4			

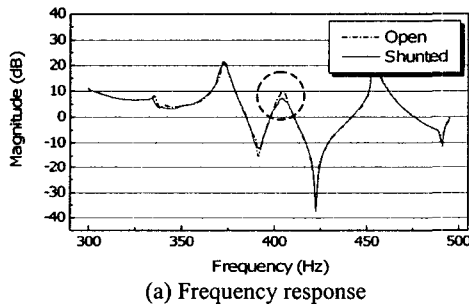


(a) Frequency response

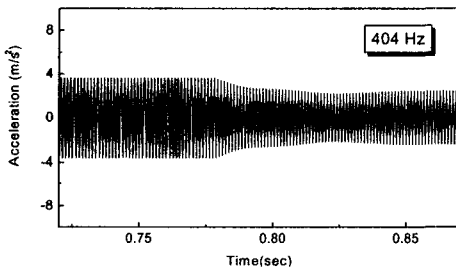


(b) Time response at target mode

Fig. 10 Experimental results by piezoelectric damping (251Hz)



(a) Frequency response



(b) Time response at target mode

Fig. 11 Experimental results by piezoelectric damping (404 Hz)

압전재료의 종류와 부착위치는 최적화 되지 않았으며 이는 주파수 응답특성에서 주요 모드라 할 수 있는 223Hz, 284Hz, 375 Hz, 452Hz 등에서의 진동 저감 효과를 볼 수 없었던 주요 요인이라 사료된다. 추후, 유한요소 해석과 압전재료의 물리적 특성을 연계하여 압전재료의 종류 및 구조물에의

부착위치 등의 변화에 따른 어드미턴스 값의 유추와 보다 향상된 진동 저감 성능 예측을 시도할 예정이다.

## 후기

본 연구는 한국과학재단 연세대학교 정보저장기기 연구센터의 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 정선중, "프린터/광저장장치 기술/시장 보고서," 한국전자통신연구원, 2000.
2. 장승환, 김현석, 최진경, 이대길, "고배속 CD-ROM Drive의 진동댐퍼 설계에 관한 연구," 대한기계학회 논문집 A, 1998, 제 22 권, 제 4 호, pp. 939-952.
3. 김남용, 김국원, 홍구, 정문채, 김의열, "슬림형 광 디스크 드라이브의 방진설계," 한국소음진동공학회지, 1999, 제 9 권, 제 2 호, pp. 324-330.
4. 김국원, 임종락, 안태길, "방진고무의 대변형 해석 및 동특성 고찰," 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, 1998, pp. 766-770.
5. Lee, J. and W. K. Van Moorhen, "Analytical and Experimental Analysis of a Self-Compensating Dynamic Balancer in a Rotating Mechanism," *ASME Journal of Dynamic System, Measurements, and Control*, 1996, Vol. 118, pp. 468-475.
6. 최승복, 김형규, 임수철, 박영필, "ER CD-ROM 마운트를 이용한 드라이브 퍼딩 시스템의 진동 제어," 한국소음진동공학회지, 1999, 제 9 권, 제 6 호, pp. 1247-1258.
7. 박건순, 임종락, 한용희, 손희기, "광디스크 드라이브의 진동특성에 대한 유한요소해석," 한국소음진동학회 춘계학술대회 논문집, 1998, pp. 227-232.
8. 박중성, 임수철, 최승복, 김재환, 박영필 "압전 선트회로를 이용한 광디스크 드라이브의 진동 저감," 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, 2001, pp. 972-976
9. N.W. Hagood, A. von Flotow, "Damping of Structural Vibrations with Piezoelectric Materials and Passive Electrical Networks", *J. of Sound and Vibration*, 1991, Vol. 146(2), pp. 243-268
10. J. J. Hollkamp, "Multimodal Passive Vibration Suppression with Piezoelectric Materials and Resonant Shunt", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1994, Vol. 5, pp. 49-57
11. J. Kim, Y. H. Ryu, S. B. Choi "New shunting parameter tuning method for piezoelectric damping based on measured electrical impedance", *Smart materials & structures*, 2000, Vol. 9, pp. 868-877